

УДК 621.771

**ОПТИМИЗАЦИЯ SIMULINK-МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА
РАБОЧИХ ВАЛКОВ ПРОКАТНОГО СТАНА ДУО-160****Мальцев Андрей Анатольевич**

к.т.н., доцент кафедр ФН-7 и МТ-10 МГТУ им Н.Э. Баумана

e-mail: a.a.mal@bmstu.ru**Аннотация**

Построена и оптимизирована крутильно-колебательная Simulink-модель электропривода прокатного стана дуо-160 с учетом люфтов.

Ключевые слова: Simulink, электропривод, прокатный стан, люфт.

**OPTIMIZATION OF SIMULINK-MODEL OF WORKING ROLLS
ELECTRIC DRIVE OF THE DUO-160 ROLLING MILL****Andrey A. Maltsev**

Ph.D. (Eng.), Associate Professor of Engineering,

BMSTU ФН-7 and МТ-10 Departments

e-mail: a.a.mal@bmstu.ru**ABSTRACT**

The torsional-oscillatory Simulink model of the duo-160 rolling mill electric drive is constructed and optimized, taking into account backlash.

Keywords: Simulink, electric drive, rolling mill, backlash.

Объект и предмет исследования.

Объект исследования – одноклетьевого прокатный стан дуо-160 (рис. 1).

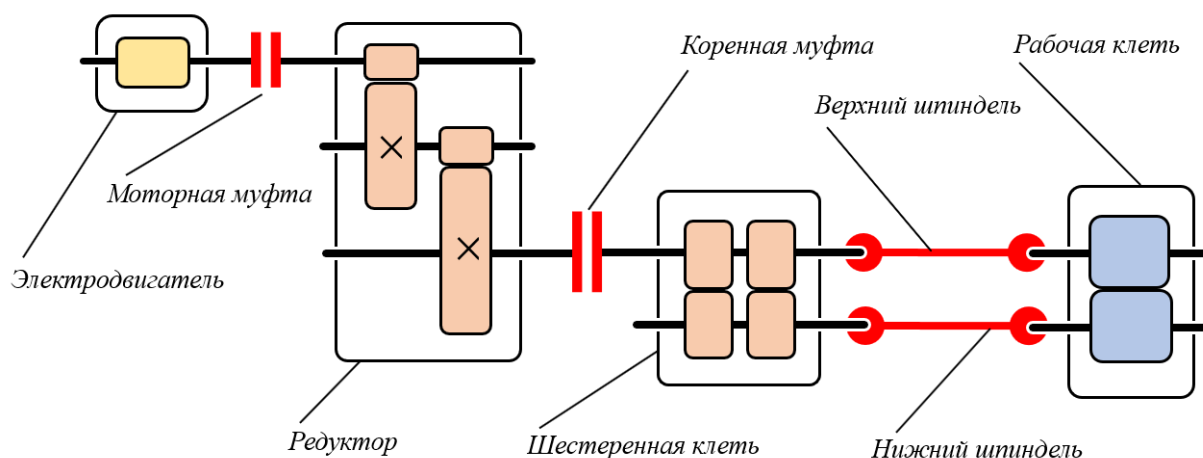


Рисунок 1. Кинематическая схема прокатного стана дуо-160

Предмет исследования – переходный процесс в электроприводе стана дуо-160 при ударе прокатываемой заготовки о рабочие валки (рис. 2).

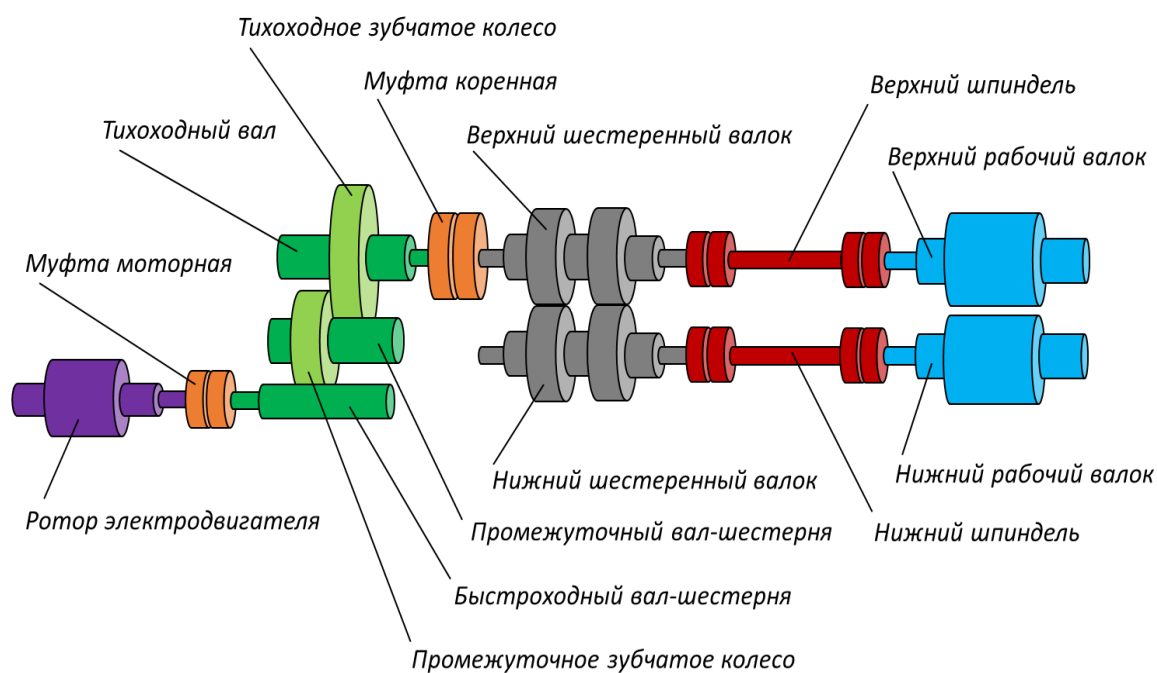


Рисунок 2. Физическая модель электропривода дуо-160

Цель и задача исследования.

Цель исследования – изучить негативное влияние люфтов в зубчатых передачах, шарнирных и муфтовых соединениях на работу электропривода рабочих валков стана дуо-160 (рис. 3).

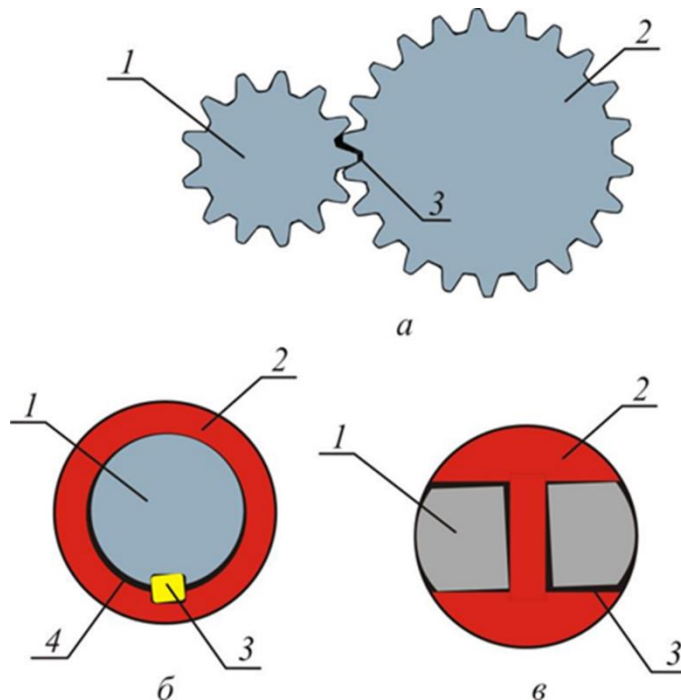


Рисунок 3. Люфты в электроприводе дуо-160:

а – люфт в зубчатой передаче

(1 – шестерня; 2 – зубчатое колесо; 3 – люфт)

б – люфт в муфтовом соединении

(1 – вал; 2 – полумуфта; 3 – шпонка; 4 – люфт)

в – люфт в шарнирном соединении

(1 – лопасть; 2 – вилка; 3 – люфт)

Неоспоримым критерием истины в исследовательской деятельности по изучению характера крутильных колебаний является тензометрический эксперимент в заводских условиях на работающем прокатном стане дуо-160, однако на практике возникают сложности с регулировкой люфтов в широком диапазоне. Кроме того, проведение тензометрических экспериментов требует финансовых затрат на приобретение качественной фирменной аппаратуры, а кустарное изготовление простейшего тензометрического канала (рис. 4) не гарантирует высокой точности измерения динамического крутящего момента.

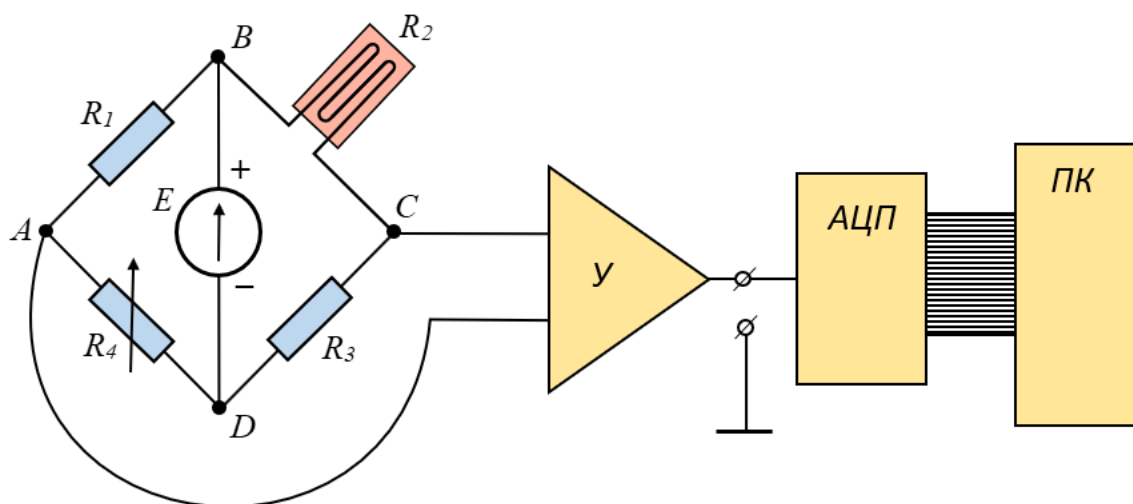


Рисунок 4. Тензометрическая аппаратура для дуо-160:

- E – источник электропитания;
- R_1, R_3 – электрические сопротивления;
- R_2 – тензорезистор (датчик);
- R_4 – потенциометр (реохорд);
- $У$ – усилитель сигнала с тензодатчика;
- АЦП – аналого-цифровой преобразователь;
- ПК – персональный компьютер

Существует теоретический путь исследования переходного процесса (крутильных колебаний), альтернативный тензометрическому эксперименту и связанный с математическим моделированием [1, 2, 3] на ЭВМ (рис. 5).

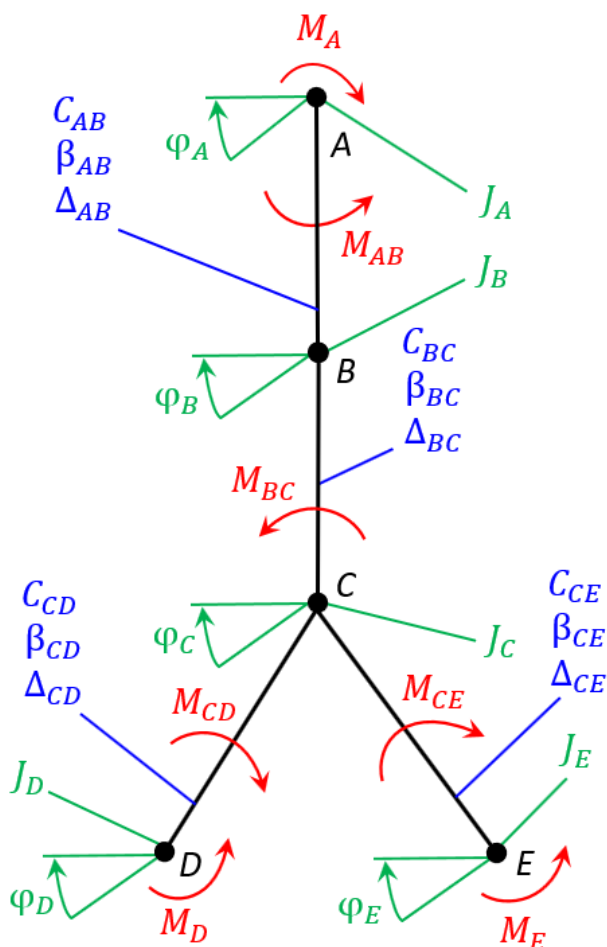


Рисунок 5. Крутильно-колебательная модель дуо-160:
 A, B, C, D, E – абсолютно жесткие диски (массы);
 AB, BC, CD, CE – крутильно-упругие невесомые связи;
 $\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C, \varphi_D, \varphi_E$ – угловые координаты дисков;
 M_A, M_D, M_E – внешние крутящие моменты;
 $M_{AB}, M_{BC}, M_{CD}, M_{CE}$ – упругие крутящие моменты связей;
 J_A, J_B, J_C, J_D, J_E – осевые моменты инерции дисков;
 $C_{AB}, C_{BC}, C_{CD}, C_{CE}$ – крутильные жесткости связей;
 $\beta_{AB}, \beta_{BC}, \beta_{CD}, \beta_{CE}$ – коэффициенты демпфирования связей;
 $\Delta_{AB}, \Delta_{BC}, \Delta_{CD}, \Delta_{CE}$ – люфты (зазоры) в связях

Задача исследования – построить крутильно-колебательную Simulink-модель электропривода дуо-160, учитывающую люфты, и оптимизировать ее структуру, если математически угловые ускорения $\varepsilon_A, \varepsilon_B, \varepsilon_C, \varepsilon_D, \varepsilon_E$ [рад/с²] дисков A, B, C, D, E записываются так:

$$\varepsilon_A = d\omega_A/dt = \frac{M_A - M_{AB}}{J_A}; \tag{1}$$

$$\varepsilon_B = d\omega_B/dt = \frac{M_{AB} - M_{BC}}{J_B}; \tag{2}$$

$$\varepsilon_C = d\omega_C/dt = \frac{M_{BC} - M_{CD} - M_{CE}}{J_C}; \quad (3)$$

$$\varepsilon_D = d\omega_D/dt = \frac{M_{CD} - M_D}{J_D}; \quad (4)$$

$$\varepsilon_E = d\omega_E/dt = \frac{M_{CE} - M_E}{J_E}, \quad (5)$$

где упругие крутящие моменты связей

$$M_{AB} = C_{AB}[\varphi_A - \varphi_B] + \beta_{AB}[\omega_A - \omega_B];$$

$$M_{BC} = C_{BC}[\varphi_B - \varphi_C] + \beta_{BC}[\omega_B - \omega_C];$$

$$M_{CD} = C_{CD}[\varphi_C - \varphi_D] + \beta_{CD}[\omega_C - \omega_D];$$

$$M_{CE} = C_{CE}[\varphi_C - \varphi_E] + \beta_{CE}[\omega_C - \omega_E];$$

$\omega_A, \omega_B, \omega_C, \omega_D, \omega_E$ [рад/с] – угловые скорости дисков;

$$\omega_A = d\varphi_A/dt;$$

$$\omega_B = d\varphi_B/dt;$$

$$\omega_C = d\varphi_C/dt;$$

$$\omega_D = d\varphi_D/dt;$$

$$\omega_E = d\varphi_E/dt.$$

Материалы и методы исследования.

Исходные данные — значения параметров крутильно-колебательной модели электропривода прокатного стана дуо-160:

$$\begin{aligned}
 M_A &= 1000 \text{ [Н} \cdot \text{м]}; \\
 M_D &= 600 \text{ [Н} \cdot \text{м]}; \\
 M_E &= 400 \text{ [Н} \cdot \text{м]}; \\
 J_A &= 0,87 \text{ [кг} \cdot \text{м}^2]; \\
 J_B &= 0,38 \text{ [кг} \cdot \text{м}^2]; \\
 J_C &= 0,001 \text{ [кг} \cdot \text{м}^2]; \\
 J_D &= 0,0001 \text{ [кг} \cdot \text{м}^2]; \\
 J_E &= 0,0001 \text{ [кг} \cdot \text{м}^2]; \\
 C_{AB} &= 224\,000 \text{ [Н} \cdot \text{м/рад]}; \\
 C_{BC} &= 963,9 \text{ [Н} \cdot \text{м/рад]}; \\
 C_{CD} &= 414,4 \text{ [Н} \cdot \text{м/рад]}; \\
 C_{CE} &= 414,4 \text{ [Н} \cdot \text{м/рад]}. \\
 \beta_{AB} &= 0,545 \text{ [Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с/м]}; \\
 \beta_{BC} &= 0,02 \text{ [Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с/м]}; \\
 \beta_{CD} &= 0,001 \text{ [Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с/м]}; \\
 \beta_{CE} &= 0,001 \text{ [Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с/м]}. \\
 \Delta_{AB} &= var \text{ [рад]}; \\
 \Delta_{BC} &= var \text{ [рад]}; \\
 \Delta_{CD} &= var \text{ [рад]}; \\
 \Delta_{CE} &= var \text{ [рад]}.
 \end{aligned}$$

Начальные условия — нулевые:

$$\begin{aligned}
 \varphi_A(0) &= \varphi_B(0) = \varphi_C(0) = \varphi_D(0) = \varphi_E(0) = 0 \text{ [рад]}; \\
 \omega_A(0) &= \omega_B(0) = \omega_C(0) = \omega_D(0) = \omega_E(0) = 0 \text{ [рад/с]}; \\
 \varepsilon_A(0) &= \varepsilon_B(0) = \varepsilon_C(0) = \varepsilon_D(0) = \varepsilon_E(0) = 0 \text{ [рад/с}^2\text{]}; \\
 M_{AB}(0) &= M_{BC}(0) = M_{CD}(0) = M_{CE}(0) = 0 \text{ [Н} \cdot \text{м]}.
 \end{aligned}$$

Для исследования методом имитационного моделирования влияния люфтов на крутильные колебания в электроприводе прокатного стана дуо-160 по формулам (1) – (5) построена Simulink-модель (рис. 6, 7).

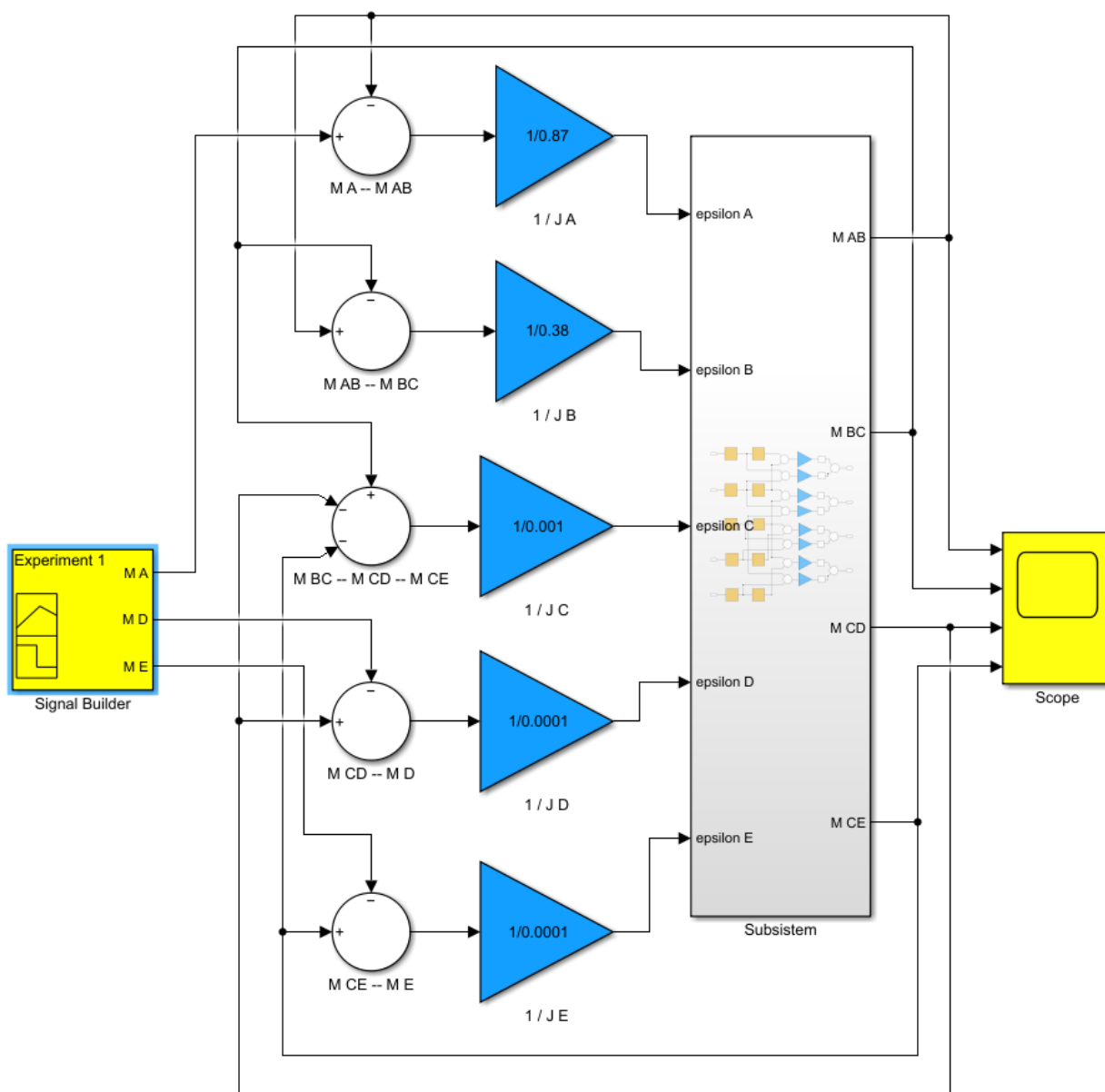


Рисунок 6. Simulink-модель электропривода дуо-160:
 Блок «Signal Builder» – построитель сигналов $M_A(t)$, $M_D(t)$, $M_E(t)$;
 Блок «Scope» – четырехканальный осциллограф контроля сигналов $M_{AB}(t)$, $M_{BC}(t)$, $M_{CD}(t)$, $M_{CE}(t)$

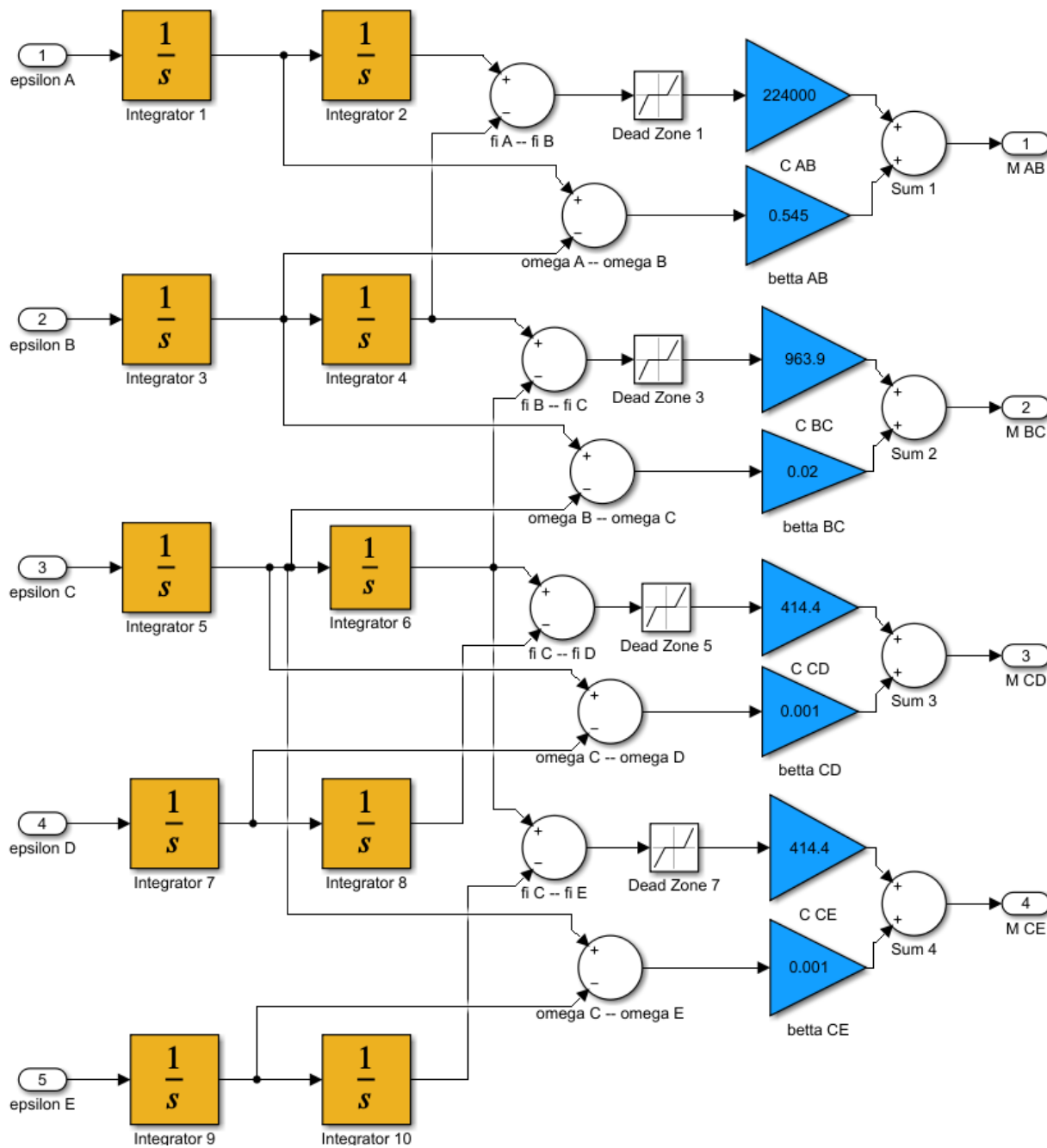


Рисунок 7. Подсистема «Subsystem»:
 Блоки «Integrator 1, 2, ..., 10» – интеграторы
 Блоки «Dead Zone 1, 2, ..., 8» – люфты
 Блоки «Sum 1, 2, 3, 4» – сумматоры

Результаты и их обсуждение.

Получены Simulink-осциллограммы (рис. 8, 9, 10) на которых видно, что при увеличении люфтов в электроприводе дуо-160 (при фиксированных значениях других параметров) амплитуды крутильных колебаний возрастают.

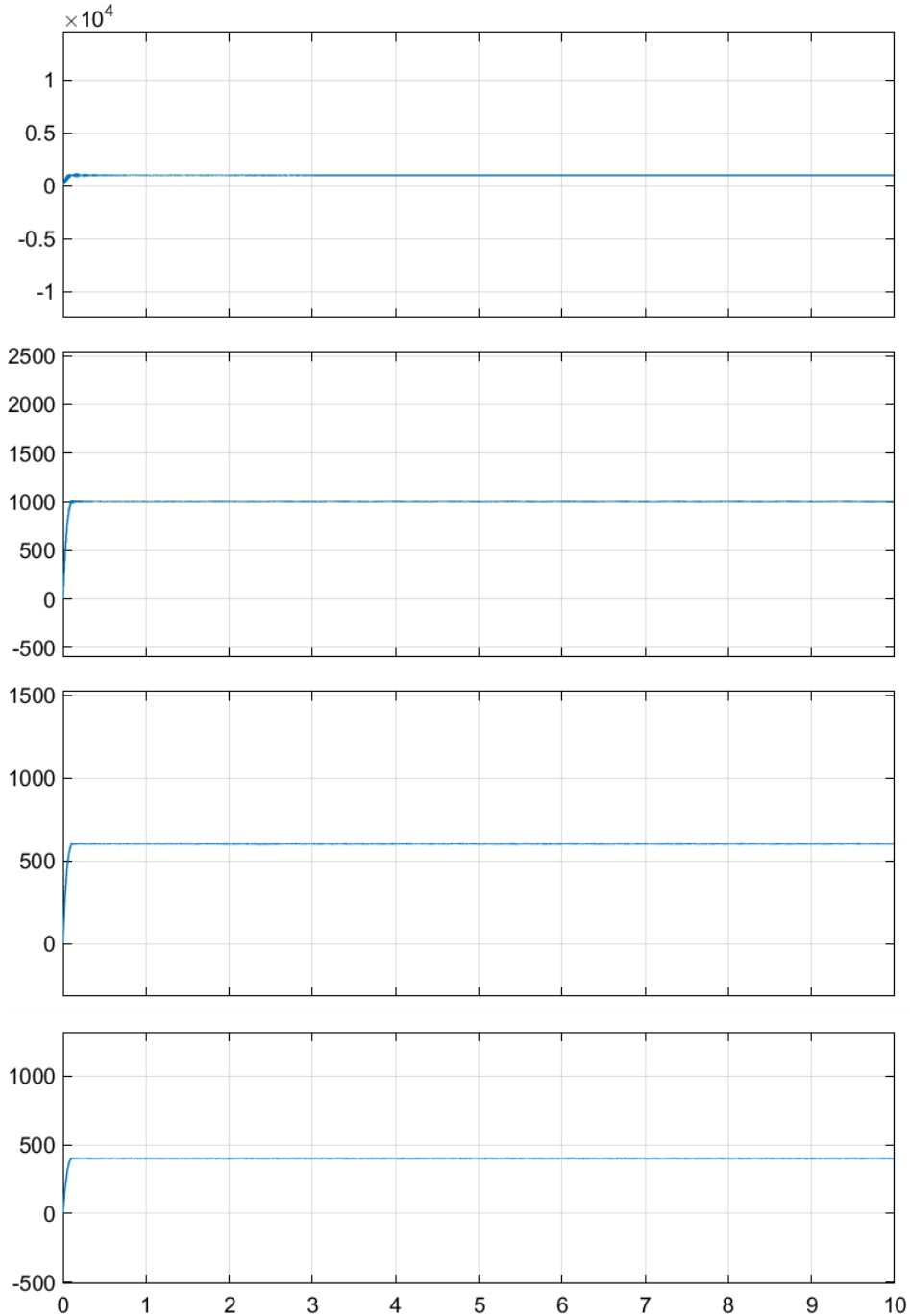


Рисунок 8. Осциллограммы $M_{AB}(t)$, $M_{BC}(t)$, $M_{CD}(t)$, $M_{CE}(t)$:
люфты Δ_{AB} , Δ_{BC} , Δ_{CD} , Δ_{CE} отсутствуют

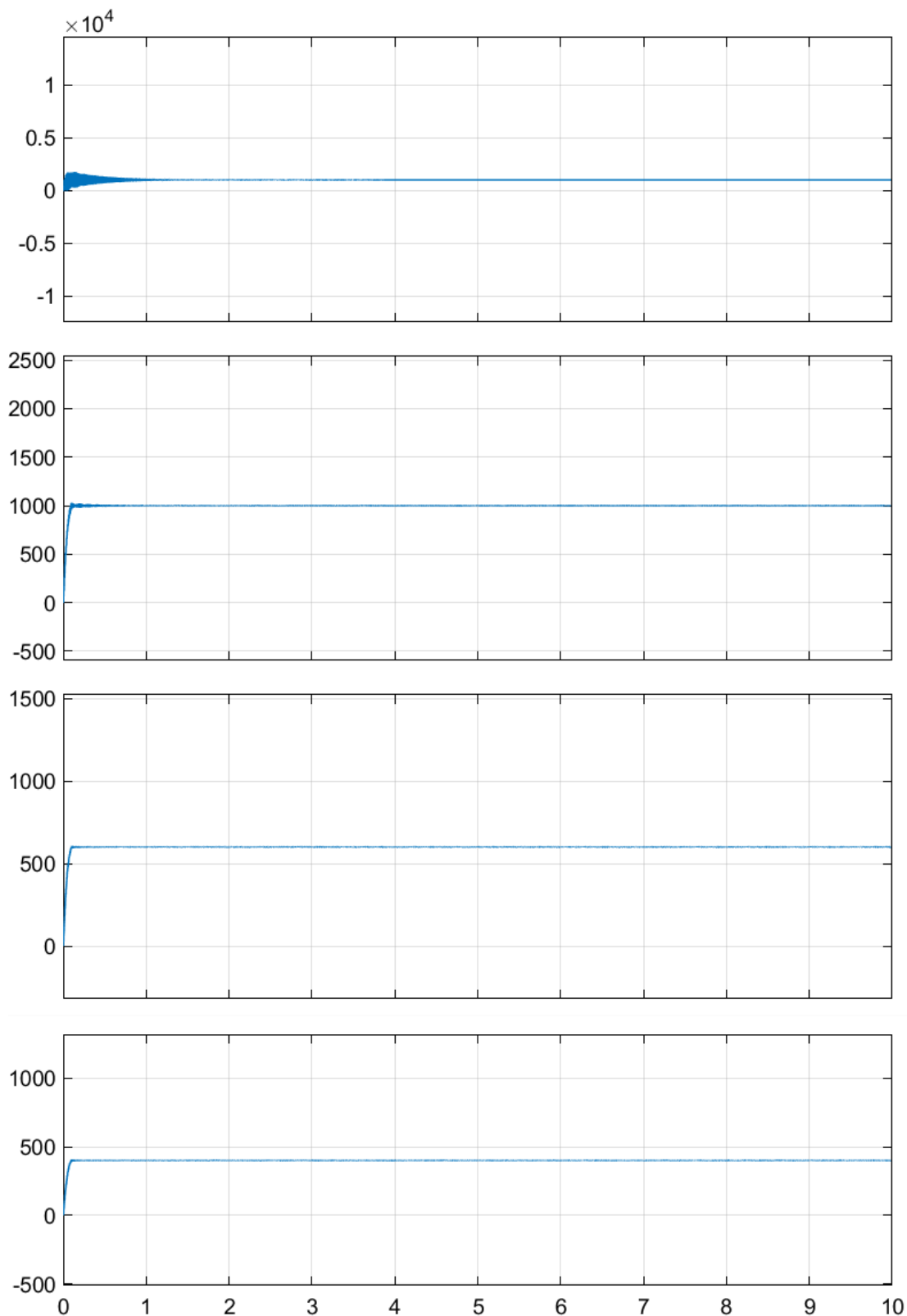


Рисунок 9. Осциллограммы $M_{AB}(t), M_{BC}(t), M_{CD}(t), M_{CE}(t)$:
 $\Delta_{AB}, \Delta_{BC}, \Delta_{CD}, \Delta_{CE}$ [рад] $\in [-0,01; 0,01]$

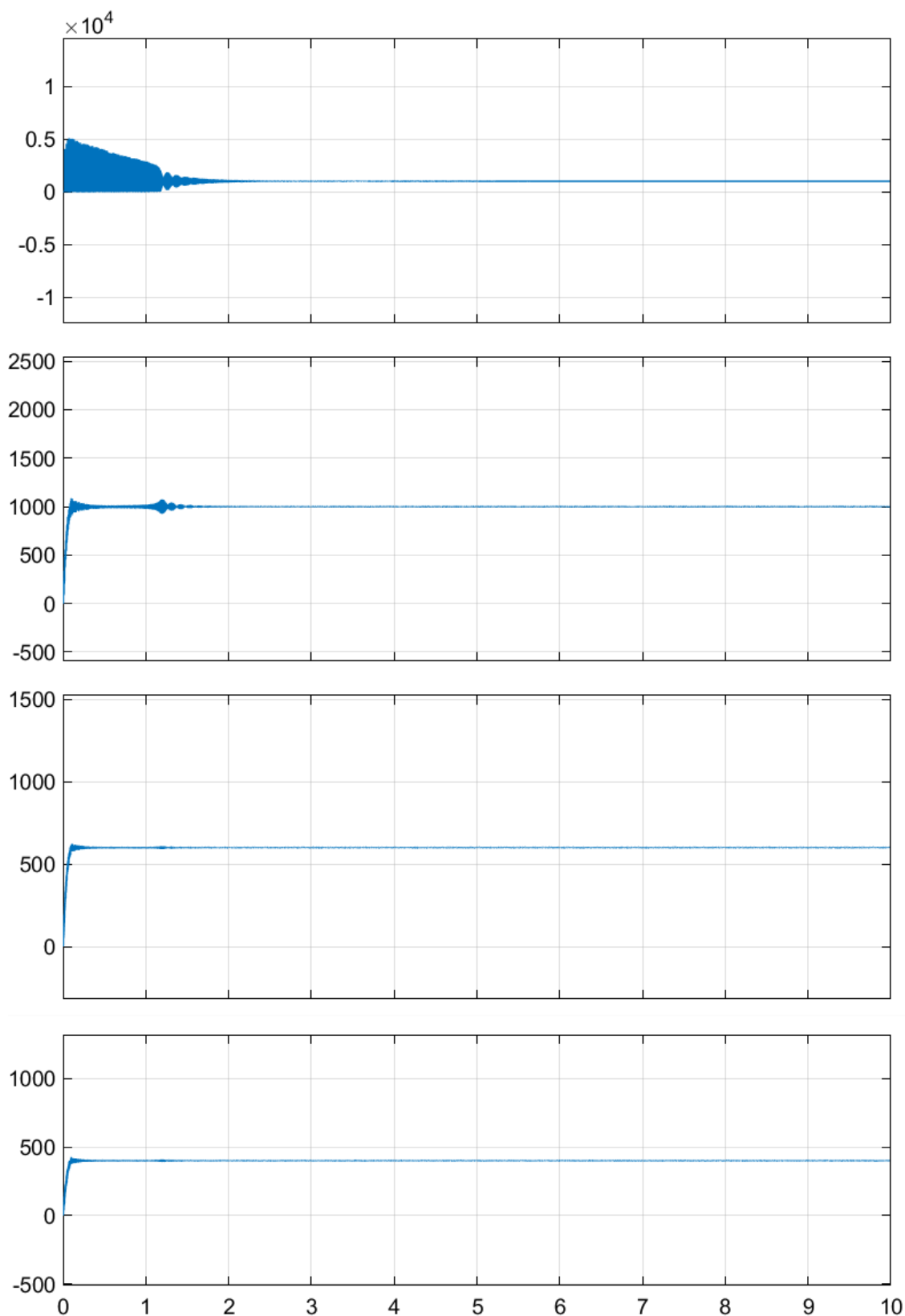


Рисунок 10. Осциллограммы $M_{AB}(t), M_{BC}(t), M_{CD}(t), M_{CE}(t)$:
 $\Delta_{AB}, \Delta_{BC}, \Delta_{CD}, \Delta_{CE}$ [рад] $\in [-0,1; 0,1]$

Заключение.

Проведенный вычислительный эксперимент по изучению влияния люфтов на характер крутильных колебаний в электроприводе прокатного стана дуо-160 будет полезен студентам, обучающимся по специальности «Проектирование технологических машин и комплексов», при написании ими научно-исследовательской части дипломного проекта.

Список литературы.

1. Мальцев А.А. Оптимизация параметров крутильно-колебательной модели электропривода прокатного стана средствами Simulink. – [Электронный ресурс] Оригинальные исследования (ОРИС). 2021. т.11, №7. С.109–119. – Режим доступа: <https://ores.su/ru/journals/oris-jrn/2021-oris-7-2021/a230351>
2. Мальцев А.А. Оптимизация параметров Simulink-модели электропривода прокатного стана по критерию минимизации длительности переходного процесса. – [Электронный ресурс] Оригинальные исследования (ОРИС). 2021. Т.11, №8. С.67–81. – Режим доступа: <https://ores.su/ru/journals/oris-jrn/2021-oris-8-2021/a230367>
3. Мальцев А.А. Параметрическая оптимизация Simulink-модели электропривода прокатного стана по критерию минимизации динамических нагрузок. – [Электронный ресурс] Оригинальные исследования (ОРИС). 2021. Т.11, №9. С.127–141. – Режим доступа: <https://ores.su/ru/journals/oris-jrn/2021-oris-9-2021/a230390>

References.

1. Andrey A. Maltsev. Optimization of the parameters of the torsional-oscillatory model of the electric drive of the rolling mill by means of Simulink. – [Electronic resource] Original research (ORIS). 2021. Vol.11, No.7. P.109–119. – Access mode: <https://ores.su/ru/journals/oris-jrn/2021-oris-7-2021/a230351>.
2. Andrey A. Maltsev. Optimization of the parameters of the Simulink model of the electric drive of the rolling mill according to the criterion of minimizing the duration of the transition process. – [Electronic resource] Original research (ORIS). 2021. Vol.11, No.8. P.67–81. – Access mode: <https://ores.su/ru/journals/oris-jrn/2021-oris-8-2021/a230367>
3. Мальцев А.А. Parameter optimization of the electric drive Simulink model of a rolling mill according to the criterion of minimizing the dynamic loads. – [Electronic resource] Original research (ORIS). 2021. Vol.11, No.9. P.127–141. – Access mode: <https://ores.su/ru/journals/oris-jrn/2021-oris-9-2021/a230390>